

05;11

О структурных изменениях поверхностного слоя сплава ЭК79-ИД после упрочняющей обработки

© Д.В. Павленко, С.В. Лоскутов, В.К. Яценко, Н.В. Гончар

Запорожский национальный технический университет, Украина
E-mail: svl@zstu.edu.ua

Поступило в Редакцию 1 ноября 2002 г.

Представлены экспериментальные данные изменения упругопластических характеристик поверхностного слоя образцов из сплава ЭК79-ИД в зависимости от степени поверхностного наклепа. Показано, что в зависимости от степени наклепа наблюдается немонокотное изменение модуля упругости и условного предела текучести поверхностного слоя. Анализируются возможные механизмы изменения модуля упругости в процессе структурных изменений поверхностного слоя материала, вызванного деформационным упрочнением.

Известно, что состояние поверхностного слоя оказывает большое влияние на несущую способность деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения. Поэтому большинство методов, применяемых в настоящее время для повышения сопротивления усталости, направлены в первую очередь на формирование благоприятных характеристик поверхностного слоя.

Среди разнообразия характеристик поверхностного слоя после упрочнения поверхностным пластическим деформированием особое место занимают модуль упругости и предел текучести. Учитывая, что в литературе практически отсутствуют результаты исследований физико-механических характеристик поверхностного слоя жаропрочного сплава на никелевой основе ЭК79-ИД в зависимости от степени его пластической деформации после упрочнения, такие исследования являются весьма актуальными.

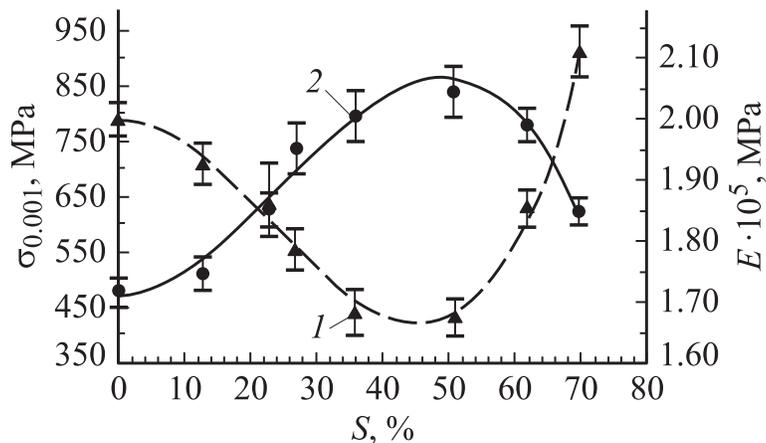
Параметры поверхностного слоя измеряли на плоских образцах из сплава ЭК79-ИД после упрочнения поверхностным пластическим деформированием металлическими шариками на ультразвуковой уста-

новке. Степень поверхностного наклепа определяли по изменению микротвердости поверхности до и после упрочнения на приборе ПМТ-3.

Для определения характеристик пластичности и упругости поверхностного слоя образцов в исходном состоянии и после деформационного упрочнения использовали метод кинетического индентирования [1,2] в предположении линейной зависимости между модулем контактной упругости и модулем упругости при растяжении [3,4]. Модуль упругости материала поверхностного слоя определяли из выражения для модуля контактной упругости. Измерялись время, нагрузка и контактное электросопротивление (КЭС) в процессе вдавливания сферического индентора в образец. Использовали решение задачи Герца для упругого взаимодействия двух тел. Для установления взаимосвязи между КЭС и фактической площадью контакта проводили тарировочные испытания на кинетическое индентирование образцов из монокристаллического ниобия. Значение кинетической твердости в тонком поверхностном слое находили путем непрерывного вдавливания сферического индентора, регистрации усилия вдавливания и фактической площади контакта. С учетом жесткости испытательной машины глубина проникновения индентора в поверхностный слой составляла 48...53 мкм. Экспериментальные зависимости модуля упругости и условного предела упругости от степени поверхностного наклепа образцов представлены на рисунке.

Минимальное значение предела упругости соответствует исходным образцам (см. рисунок). Поверхностное упрочнение при степени наклепа, не превышающей 50%, приводит к повышению предела упругости и соответственно предела выносливости материала. Однако при дальнейшем увеличении степени наклепа происходит резкое снижение предела упругости, что, вероятно, связано с так называемым перенаклепом, при котором происходят потеря сплошности материала и появление субмикроскопических трещин.

Характер изменения модуля упругости поверхностного слоя прямо противоположен изменению предела упругости. Это связано с тем, что в процессе поверхностного пластического деформирования растет плотность кристаллических дефектов — атомов с ослабленными связями, в результате снижающих модуль упругости. Одновременно с этим накапливается остаточная микропластическая деформация и формируется плосконапряженное состояние материала приповерхностного слоя. Рентгенодифрактометрический анализ исследуемых образцов показал, что при обработке поверхности шариками в ультразвуковом



Изменение модуля упругости (1) и условного предела упругости (2) в зависимости от степени поверхностного наклепа.

поле формируются остаточные сжимающие макронапряжения. Последние, упруго деформируя кристаллическую решетку, сближают атомы в плоскости образца, что и приводит к росту модуля упругости. Таким образом, в процессе обработки сплава поверхностным пластическим деформированием действуют два противоположно направленных фактора: понижение и повышение модуля упругости. Наблюдаемое изменение модуля упругости соответствует изменению межатомных расстояний при нагреве сплава ЭК79-ИД приблизительно на 400°C [5]. Если принять для сплава ЭК79-ИД $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$, то относительная деформация кристаллической решетки при нагреве составит $\varepsilon = \Delta a/a = 0.005$. По данным рентгенодифрактометрического анализа линии (330) образца, имеющего степень поверхностного наклепа 70%, $\varepsilon = -\text{ctg} \theta \cdot \Delta \theta = 0.002$. Получается завышенное значение приращения модуля упругости, определяемого методом кинетического индентирования. По своему физическому смыслу модуль упругости характеризует прочность межатомных связей и сильно зависит от кристаллографических направлений. Известно, что модули упругости металлов малочувствительны к структуре, но существенно изменяются с увеличением анизотропии деформированного металла. В рассматриваемом

нами случае деформированию подвергается тонкий приповерхностный слой со свободной границей, где деформационные процессы протекают с характерными особенностями. Поэтому возможной причиной значительных изменений модуля упругости материала приповерхностного слоя исследованных образцов является текстура деформации. Также известно, что в многофазных микроструктурах анизотропия свойств проявляется, если предпочтительной ориентацией обладает какая-либо фаза. Было выполнено исследование микроструктуры образцов на растровом микроскопе JSM T300 при ускоряющем напряжении 30 kV во вторичных электронах. Установлено, что размер упрочняющих γ' -частиц в поверхностном слое и среднее расстояние между ними зависят от степени поверхностного наклепа. С увеличением степени наклепа до 50% размер γ' -частиц падает приблизительно в два раза, а среднее расстояние между ними в два раза уменьшается. Поверхностная плотность этих частиц соответственно возрастает. Это означает, что площадь поверхности, занимаемой γ' -частицами, не изменяется, а происходит только их дробление. Так как процесс дробления связан с пластической деформацией, а при деформации ГЦК-металлов скольжение идет по плоскостям типа (111) в одном из направлений [110], то становится вероятным формирование текстуры деформации. Таким образом, приведенные рассуждения подтверждают экспериментально полученную зависимость модуля упругости от степени поверхностного наклепа.

Согласно зависимости, приведенной на рисунке, в диапазоне наклепа до 50% бóльшую пластичность поверхностного слоя будет иметь тот образец, степень поверхностного наклепа которого выше. В этом диапазоне степеней наклепа происходит уменьшение модуля упругости, и, как следствие, амплитуды действующих переменных напряжений в поверхностном слое детали. По аналогии с формулой запаса прочности, отношение предела упругости к модулю упругости можно условно назвать запасом прочности поверхностного слоя:

$$n_1(S) = \frac{\sigma_{0.001}(S)}{E(S)}. \quad (1)$$

Описывая функции $\sigma_{0.001}(S)$ и $E(S)$ полиномиальной зависимостью третьего порядка, был получен полином, определяющий прочность поверхностного слоя сплава ЭК79-ИД после деформационного упроч-

нения шариками (коэффициент корреляции $R = 0.98$):

$$n_1(S) = -0.05S^3 + 3.93S^2 - 9.91S + 2312, \quad (2)$$

где S — степень поверхностного наклепа, %.

В результате экспериментального изучения физико-механических параметров приповерхностного слоя образцов из сплава ЭК79-ИД обнаружен сложный характер изменения модуля упругости в зависимости от степени поверхностного деформирования. Проведен анализ возможных физических механизмов, объясняющих полученные экспериментальные данные. Проведенные исследования позволили установить, что максимальная эффективность поверхностного деформационного упрочнения по критерию параметров упругости и прочности поверхностного слоя достигается при степени поверхностного наклепа в диапазоне 45...55%.

Список литературы

- [1] Бульчов С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
- [2] Лоскутов С.В. // Сб. докладов 3-й межд. конф. „Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов“. Ч. 2. Сентябрь 9–13, 2002. Харьков. Украина. С. 32–34.
- [3] Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. К.: Наук. думка, 1987. 251 с.
- [4] Прокопенко А.В., Торгов В.Н. // Проблемы прочности. 1986. № 4. С. 28–34.
- [5] Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 350 с.